

На правах рукописи



КРУЧИНИНА Ирина Юрьевна

**ВЫСОКОИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ:
ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институте химии силикатов
им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН)

Научный консультант доктор технических наук, старший научный сотрудник
Антипов Виктор Николаевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Плохов Игорь Владимирович
ФГБОУ ВПО «Псковский государственный университет»
ПсковГУ, зав. кафедрой электропривода и систем автоматизации

доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политех-
нический университет», зав. кафедрой ТОЭ

доктор технических наук, профессор
Епифанов Алексей Павлович,
«Санкт-Петербургский государственный аграрный универси-
тет», зав. кафедрой электрических машин и электрооборудова-
ния

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-
конструкторский и технологический институт электромашино-
строения» (ОАО «ВНИТИ ЭМ»)

Защита состоится « 11 » апреля 2013 г. в 10 часов на заседании диссертацион-
ного совета Д212.229.11 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный поли-
технический университет» (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
первый учебный корпус, ауд. 312).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » _____ 2013 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Д212.229.11

кандидат технических наук, доцент

Попов Максим

Георгиевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности

В XX веке тенденцией развития энергетики было наращивание единичных мощностей энергоблоков. Значительная часть обширной территории России лишена централизованного энергоснабжения. Это является серьезным основанием для развития автономной энергетики, поэтому современная энергетика отличается тенденциями децентрализации, значительными потребностями в электрических машинах различных типов и повышением требований к их техническим, эксплуатационным, экономическим и другим характеристикам. Одной из стратегических целей развития электроэнергетики в России на период до 2020 года является расширение применения автономных энергоустановок высокой эффективности, класса генераторов средней и малой мощности, обеспечение устойчивого развития электроэнергетики на базе современных технологий и материалов. Одним из важных современных направлений энергетики является развитие распределенной генерации на базе строительства электростанций небольшой мощности, малых ТЭЦ с парогазовыми или газотурбинными установками, имеющих преимущество за счет скорости возведения и уменьшенных инвестиций. Энергоснабжение автономных потребителей предполагает высокую надежность, простоту конструкции и обслуживания. Эти требования обосновывают применение постоянных магнитов в качестве источников возбуждения электрической машины.

Практика электромашиностроения и указанные обстоятельства выдвигают задачи разработки серий высокооборотных синхронных генераторов малой и средней мощности (от нескольких киловатт до десятков мегаватт) с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) в диапазоне частот вращения от 15000 мин^{-1} до 100000 мин^{-1} нетрадиционного исполнения, с высоким КПД и сниженным уровнем потерь и низкооборотных генераторов для микроГЭС и ветростанций. Это связано с решением проблем экологии и энергосбережения и соответствует мировой тенденции все большего использования возобновляемых низкопотенциальных источников энергии – ветра, приливов, волн, морских и речных течений. Одним из актуальных современных применений является разработка СГПМ для гибридных автомобилей. Оперативное проектирование СГПМ для расширения номенклатуры энергоустановок при необходимости введения модификаций особенно ценно в условиях рынка.

Синхронные машины с постоянными магнитами обладают высоким коэффициентом полезного действия (КПД), имеют надежную систему возбуждения, исключают необходимость применения щеточного аппарата, отличаются быстро затухающими переходными процессами, простотой системы охлаждения (без потерь на возбуждение). В тоже время отсутствие обмотки возбуждения и демпферной обмотки обостряет проблему статической устойчивости, исключает возможность форсировки возбуждения в момент наброса нагрузки. Большие частоты вращения ротора накладывают требования преобразования выработанной генератором электроэнергии посредством выпрямителя, преобразователя, инвертора, трансформатора до величины промышленной частоты.

Следовательно, проблемы создания нового поколения синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для автономной энергетики

многоплановы, связаны с обеспечением высокого технического уровня разработки новых конструктивных и материаловедческих решений для ряда актуальных научно-технических задач: оптимизации конструкций ротора по критериям прочности для обеспечения целостности магнитной системы при больших частотах вращения; изучения уровня вибраций и способов борьбы с ними, исследования особенностей проектирования пазовой зоны статора для уменьшения «провала» напряжения при внезапных набросах нагрузки в процессе эксплуатации генераторов; подтверждения эффективности обмоток с дробным шагом для низкооборотных машин при совершенствовании и развитии методов моделирования электромагнитных полей, напряженно-деформированного состояния элементов конструкции машин, методов расчета добавочных потерь; исследования возможностей снижения потерь применением новых материалов с требуемыми свойствами (снижение потерь в стали, в магнитах), с целью повышения их энергетических показателей.

Недостаточно высокий уровень таких энергетических показателей, как коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент мощности ($\cos\varphi$), ограничивает применение другого типа машин - асинхронных двигателей с массивным ротором (АДМР), незаменимых и востребованных в ряде современных практических применений: (электроприводы с тяжелыми условиями пуска, повторно-кратковременные режимы работы, системы автоматики, управления, с широким диапазоном регулирования частоты вращения, погружные асинхронные электродвигатели для нефтедобычи и т.п.) благодаря таким преимуществам как высокая кратность пускового момента, мягкая механическая характеристика, повышенная термическая стойкость в переходных процессах, отсутствие пульсаций вращающего момента. Для решения проблем повышения энергетических показателей АДМР необходимо разработать эффективные методы их исследования на основе имеющегося опыта разработки электрических машин различных типов и развитых теоретических методов исследования магнитных полей. Следует отметить работы Демирчяна К.С., Вольдека А.И., Данилевича Я.Б., Бутырина П.А., Иванова-Смоленского А.В., Копылова И.П., Постникова И.М., Куцевалова В.М., Кашарского Э.Г., Хуторецкого Г.М., Чубраевой Л.И., Коровкина Н.В., Попова В.В., Забоина В.Н., Сидельникова Б.В., Богуславского И.З., Гуревича Э.И., Плохова И.В., Скобелева В.Е., Епифанова А.П., Смолоника С.В., Антипова В.Н., Гончаренко Р.Б., Шакирова М.А., Голландцева Ю.А., J. Pyrhonen, H. Kuss, J.A. Tegopolous, E. Spooner, Oberretl K. и др., внесших значительный вклад в решение этих задач. Разработанный в диссертации метод исследования рабочих характеристик АДМР открывает возможности повышения энергетических показателей электрических машин данного типа.

Цели и задачи

Целью настоящей работы является решение ряда методологических, технологических и материаловедческих проблем создания высокоиспользованных электрических машин для современной энергетики - синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) и асинхронных двигателей с массивным ротором (АДМР) - посредством разработки эффективных методов расчета и средств их исследования.

Для реализации поставленной цели были решены методологические задачи исследования АДМР и СГПМ:

- разработаны 2D и 3D модели для оценки влияния свойств материалов и особенностей конструкции массивного ротора на рабочие характеристики АДМР;
- разработан метод расчета рабочих характеристик АДМР на основе комбинации задач теории цепей и электромагнитных полей;
- разработана комплексная математическая модель для определения рациональной геометрии СГПМ, включающая 3D модель для численного исследования напряженно-деформированного состояния магнитной системы ротора, уточнения его размеров и оценки выбора материалов;
- уточнен общий метод расчета радиальных сил магнитного тяжения при наличии эксцентриситета ротора в режимах холостого хода и предложен метод расчета этих сил под нагрузкой в синхронных машинах, включая высокооборотные СГПМ;
- получены закономерности построения размерного параметрического ряда СГПМ;

предложены методологические и материаловедческие способы снижения потерь:

- разработан метод расчета добавочных потерь от циркуляционных и вихревых токов во всыпных обмотках, применяемых в асинхронных и синхронных машинах малой мощности;
- обоснованы материаловедческие возможности обеспечения необходимой прочности ротора высокооборотных СГПМ, повышения электромагнитных нагрузок и снижения потерь в стали;
- предложены экспериментально подтвержденные материаловедческие способы снижения механических потерь трения бочки ротора о воздух применением антифрикционных покрытий поверхности ротора высокооборотных СГПМ;

предложены технологические решения:

- обоснован выбор натягов и посадок в конструкции ротора высокооборотных СГПМ;
- предложен способ исключения гармоник четных порядков из кривой МДС однослойных всыпных обмоток;
- сформулированы правила выбора расположения постоянных магнитов в низкооборотных СГПМ в зависимости от частоты вращения.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы теории электрических машин, теоретических основ электротехники, теории упругости, метод конечных элементов. Для определения рабочих характеристик асинхронных двигателей с массивным ротором (комбинация задач теории цепей и электромагнитных полей), определения усилий магнитного тяжения при наличии эксцентриситета ротора, определения характеристик синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов используются методы численного моделирования. Для определения потерь трения о воздух на модели высокооборотного СГПМ при различных вариантах нанесенных антифрикционных покрытий проведены экспериментальные исследования на испытательном стенде.

Для оценки достоверности моделирования численными методами сопоставлялись результаты расчетов в различных пакетах прикладных программ, результаты экспериментальных исследований и литературные данные.

Научная новизна

В работе на базе современных методов численного расчета решены актуальные проблемы создания современных высокоиспользованных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для автономной энергетики в широком диапазоне мощностей и частот вращения и асинхронных двигателей с массивным ротором.

-Получены закономерности построения размерных параметрических рядов СГПМ.

-Созданы и обоснованы новые расчетные модели для:

- выбора рациональной геометрии магнитопровода высокооборотных СГПМ на основе исследования напряженно-деформированного состояния ротора,

- оценки влияния на энергетические показатели электрических машин свойств материалов массивного ротора (АДМР); бандажного цилиндра, стали статора (высокооборотные СГПМ); выбора расположения магнитов (низкооборотные СГМП).

Разработаны новые эффективные методы расчета:

- рабочих характеристик АДМР,

- усилий магнитного тяжения при наличии эксцентриситета ротора в синхронных машинах в режиме холостого хода и под нагрузкой с учетом высших пространственных гармоник,

- добавочных потерь от циркуляционных и вихревых токов, вызванных поперечными пазовыми потоками рассеяния с учетом временных гармоник во всыпных обмотках статора.

Предложены новые материаловедческие решения - способы снижения механических потерь трения бочки ротора о воздух применением антифрикционных покрытий поверхности ротора, конструктивные решения исполнения однослойных всыпных обмоток высокооборотных машин.

Положения, выносимые на защиту

К основным научным результатам, полученным лично автором, относятся:

1. Метод расчета рабочих характеристик АДМР, основанный на комбинации задач теории цепей и электромагнитных полей, в котором учитывается нелинейность сред, удельное электрическое сопротивление материала, поверхностный эффект, конечная осевая длина и особенности конструкции машины.
2. Метод расчета добавочных потерь от циркуляционных и вихревых токов, вызванных поперечными пазовыми потоками рассеяния с учетом временных гармоник во всыпной обмотке электрических машин.
3. Уточнение метода расчета радиальных сил магнитного тяжения при наличии эксцентриситета ротора в синхронных машинах в режиме холостого хода и метод расчета этих сил под нагрузкой с учетом высших пространственных гармоник.
4. Моделирование напряженно-деформированного состояния ротора высокооборотных СГПМ для окончательного выбора материала бандажа и геометрических размеров магнитной системы в рамках расчета комплексной модели.

5. Оценки влияния свойств материалов массивного ротора (для АДМР), бандажного цилиндра, стали статора, выбора расположения постоянных магнитов (для СГПМ) на рабочие характеристики электрических машин и требования к материалам, обеспечивающие требуемые показатели их использования.
6. Формулировка проблемы и разработка способа снижения механических потерь от трения ротора о воздух в высокооборотных СГПМ применением новых разработанных материалов – антифрикционных покрытий поверхности ротора.
7. Построение размерных параметрических рядов для высокооборотных и низкооборотных СГПМ.
8. Разработка моделей СГПМ для лабораторных исследований; результаты экспериментальных исследований уровня механических потерь от трения ротора о воздух в зависимости от свойств покрытий поверхности ротора высокооборотной машины.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе предложенных методов расчета и моделирования разработаны, созданы и испытаны модельные машины СГПМ мощностью 1,2 кВт, 18 000 мин⁻¹ и 50 кВт, 15 000 мин⁻¹, опытно-промышленный образец 200 кВт, 3 000 мин⁻¹ для каталитической ТЭЦ. Созданы макетные образцы вертикальных ветротурбин, демонстрационных и опытных ветроустановок, низкооборотный генератор СГПМ-10-150Т (10 кВт, 380 В, 16,9 А, 150 мин⁻¹) для энерговетроустановки с карусельной ветротурбиной. Макеты созданы для проверки и подтверждения разработанных методов и являются этапом для создания головных образцов машин.

Разработаны варианты СГПМ для широкого ряда мощностей (50 до 6 000 кВт) и частоты вращения от 12 000 мин⁻¹ до 48 000 мин⁻¹. Для малоразмерной газотурбинной установки МТГ-250 ФГУП «УАП «Гидравлика» разработан турбогенератор СГПМ-0,25-48000 (250 кВт, 400 В, 48 000 мин⁻¹). Разработаны модельный турбогенератор СГПМ-1,0-24000 (1000 кВт, 400 В, 24 000 мин⁻¹) и перспективный турбогенератор для децентрализованной энергетики мощностью 6,0 МВт на частоту вращения 12000 мин⁻¹, имеющий улучшенные технико-экономические показатели за счет материаловедческих решений.

Теоретические материалы диссертации нашли применение в учебном процессе. Материал диссертации вошел в сборники «Современная электромеханика. Проблемы и перспективы» (часть I, 2008 г., и часть II, 2011 г.), выпущенные ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», предназначенные для подготовки магистров по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнология».

Материалы диссертации и разработанные на их основе методы исследований нашли применение в учебном процессе при разработке лекционного курса «Высокоскоростные синхронные машины для децентрализованной энергетики» для магистерской подготовки по программам «Общая теория электромеханических преобразователей энергии» и «Технология проектирования и производства электромеханических преобразователей энергии» кафедры «Электрические машины» электромеханического факультета ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет». Разработан курс лекций «Общая энергетика» с ориентацией на автономную энергетику, ведется курсовое и дипломное проектирование, выполняют-

ся циклы лабораторных работ на базовой кафедре «Наноматериалы в электромеханических и электротехнических системах» факультета интеллектуальных систем управления и нанотехнологий ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по направлению 140400 - электроэнергетика и электротехника.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения и результаты диссертации докладывались на 6 российских и 8 международных научных конференциях: ICSEM 2004 (Польша, Краков), ICSEM 2006 (Греция, Кипр), ISEF 2007 (Чехия, Прага), ICSEM 2008 (Португалия, Вилламоура), ISEF 2009 (Франция, Аррас), International IEEE Conference devoted to the 150-anniversary of Alexander S. Popov (Санкт-Петербург, 2009), ICSEM 2010 (Италия, Рим), Роснанофорум (2009, Москва), Пятая российская конференция «Физические проблемы водородной энергетики» (2009, Санкт-Петербург), Общее собрание Академии электротехнических наук РФ (2011, Москва) и др.

Автор являлся в 2007-2008 годах ответственным исполнителем работ по государственным контрактам по поддержке ведущих научных школ РФ: в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» по темам: «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований по созданию транспортабельных микро ГЭС. Выбор компоновочных решений и оптимизация требований к основным элементам конструкций», «Разработка высокоскоростного турбогенератора мощностью 6 МВт с частотой 12000 об/мин для децентрализованной (локальной) энергетики» (руководитель академик Я.Б. Данилевич); в 2009-2011 годах – ответственным исполнителем работ по государственному контракту «Проведение научных исследований коллективом научно-образовательного центра по разработке физико-химических основ создания новых композиционных и гибридных наноматериалов для энергетики, оптики, экологии, медицины» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы (руководитель академик В.Я. Шевченко).

Под личным руководством автора выполняются: проект «Разработка нового поколения энергетических микротурбогенераторных установок с применением инновационных технологий получения керамики на основе наноразмерных ортофосфатов редкоземельных элементов для турбин и антифрикционных покрытий для снижения потерь трения высокооборотных мини-турбогенераторов» (2012-2013 гг.) в рамках Программы «Поддержка научных исследований, проводимых научными группами под руководством кандидатов наук по научному направлению «Энергетика, энергосбережение, ядерная энергетика» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы; гранты РФФИ по проектам: 07-08-00345-а «Исследования по созданию микротурбогенераторов предельных мощностей на основе современных материалов» (2007-2009 гг.); 11-08-00287-а «Исследование влияния антифрикционных покрытий ротора на процессы теплообмена в высокооборотных электромеханических преобразователях энергии» (2011-2013 гг.).

Публикации

Основное содержание диссертационной работы и ее результаты отражены в 46 публикациях, включая 16 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, (в том

числе, «Известия РАН. Энергетика», «Электротехника», «Альтернативная энергетика и экология», «Научно-технические ведомости СПбГПУ», «Информационно-управляющие системы»), тезисы докладов (15) и доклады (4) в трудах международных и российских конференций, 2 статьи в зарубежных журналах, 2 российских патента. Материалы диссертации вошли в сборники аналитических обзоров СПбГПУ «Современная электромеханика. Проблемы и перспективы», 2008 г. (часть I) и 2011 г. (часть II), а также в монографию «Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения» (Издательство «Наука», 2009).

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 287 страницах машинописного текста с 58 таблицами, иллюстрирована 82 рисунками, состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 237 наименований, приложения.

Автор глубоко признателен учителю и наставнику академику Янушу Брониславовичу Данилевичу за неоценимую помощь и поддержку в научной деятельности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, описаны объекты исследования, обозначены проблемы их создания. Сформулированы цели и задачи исследования, показаны возможности их решения применением разработанных методологических, технологических и материаловедческих методов. Отмечены научная новизна, практическая ценность и структура представленной работы.

В первой главе обозначены основные актуальные научно-технические проблемы создания высокоиспользованных высокооборотных СГПМ и предложены способы их решения. Проблемы создания высокооборотных СГПМ для автономной энергетики связаны с необходимостью решения методологических, материаловедческих и технологических задач, обусловленных наличием больших центробежных сил, действующих на ротор, и перспективами применения новых материалов для повышения показателей эффективности. Проблема механической прочности включает необходимость исследования напряженно-деформированного состояния вращающихся элементов конструкции и разработки ряда:

1) локальных технологических аспектов:

- способов, обеспечивающих целостность магнитной системы ротора,
- выбора натягов и посадок;

2) методологических аспектов:

- оценки возможностей создания высокоиспользованных СГПМ предельных мощностей и размерного параметрического ряда мини-турбогенераторов в диапазоне частот вращения до $100\ 000\ \text{мин}^{-1}$,
- разработки комплексной математической модели для рационального выбора геометрических размеров при заданных эксплуатационных характеристиках,

3) материаловедческих аспектов:

- выбора и оценки требуемых физических характеристик материала бандажного цилиндра для обеспечения необходимых прочностных свойств.

Оценка повышения эффективности СГПМ основана на возможностях применения постоянных магнитов с улучшенными свойствами, стали статора со сниженными потерями. Разработка отдельных вариантов высокооборотных машин производилась с целью построения размерных параметрических рядов генераторов, актуальных для мини-турбогенераторов малоразмерных газотурбинных установок (МГТУ), устанавливающих рациональную увязку их выходных параметров и характеристик с габаритными размерами при заданных эксплуатационных требованиях. Осуществлена проработка базового варианта СГПМ, основанного на патентозащищенной конструкции ротора с блоком постоянных магнитов.

Монолитность металлических конструкций магнитной системы обеспечивается сопряжением магнитной системы с валом ротора посредством «горячей» посадки, (что в значительной степени ограничено допустимой температурой нагрева собственно постоянных магнитов) с определенным натягом, обеспечивающим контакт элементов магнитной системы по ее радиальным поверхностям при номинальной частоте вращения генератора. Особенностью сопряжения в данной работе является то, что максимально возможные натяги посадки определялись из условия захлаживания подложки с магнитами (при посадке бандажа), либо тела ротора (при посадке всей магнитной системы) до температуры жидкого азота. Численными методами проведены серии расчетов контактной задачи теории упругости с различными типами материалов и толщинами бандажного цилиндра, высотой магнитов с целью выбора необходимых натягов для обеспечения монолитности магнитной системы и вала.

Возможности создания СГПМ предельных мощностей для автономной энергетики связаны с электрическими, магнитными и механическими ограничениями.

Электрические ограничения обусловлены уровнем допустимой линейной нагрузки, определяемым классом изоляции обмоток (порядка $5 \cdot 10^4$ А/м).

Магнитные ограничения связаны с уровнем насыщения материала. Особенно важно это ограничение в высокооборотных машинах, где высока частота перемагничивания материала статора. Вследствие этого величина индукции в воздушном зазоре определяется уровнем частоты перемагничивания и выбором материала сердечника (порядка 0,45-0,6 Тл). Практический интерес представляет оценка возможностей достижения в генераторах с постоянными магнитами предельных мощностей (до 200 кВт) при частотах вращения до 100000 мин^{-1} . Оценочные расчеты максимально возможных геометрических размеров магнитной системы проводятся на основе решения задачи Лямэ теории упругости, применении принципа Даламбера при ориентации на средние тангенциальные напряжения в бандажном цилиндре (как допустимые). Исходя из этого, рассматривается следующее неравенство в качестве критерия прочности:

$$\sigma_t \leq \frac{1}{3} \rho \omega^2 \left\{ (R-h)^2 \left[1 - \left(1 - \frac{H}{R-h} \right)^3 \right] + R^2 \left[1 - \left(1 - \frac{h}{R} \right)^3 \right] \right\} \frac{R-h}{h} \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – допустимое напряжение, σ_t – тангенциальное напряжение в бандажном цилиндре, ρ – плотность материала магнита и бандажного цилиндра, ω – угловая частота вращения ротора, R – внешний радиус ротора, h – радиальная толщина бандажного цилиндра, H – радиальная высота магнитов.

Неравенство (1) решается относительно величины R при заданной частоте вращения ротора, заданном допусковом напряжении и величинами h , H , в результате определяется максимально возможная из прочностных соображений ориентировочная величина внешнего диаметра ротора.

Расчетные ограничения на величину допустимого диаметра ротора в зависимости от частоты вращения показаны на рис. 1.

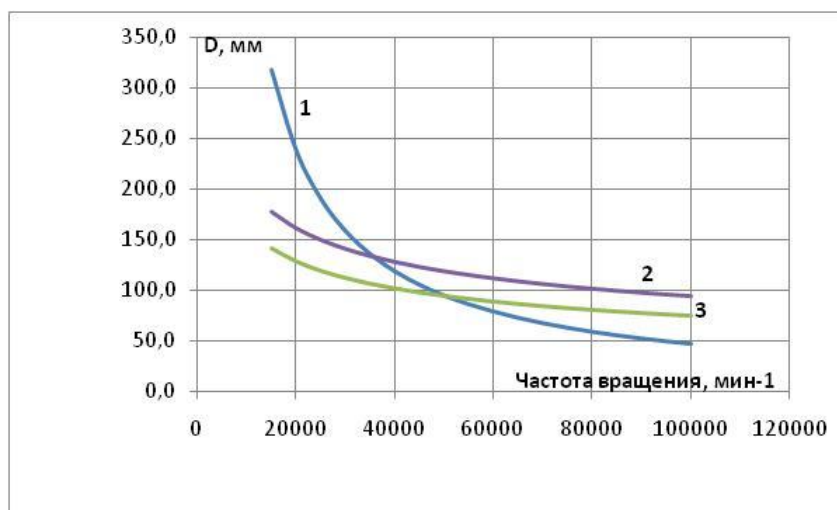


Рис. 1. Определение допустимого диаметра ротора от частоты вращения.

Зависимость 1 на рис.1. характеризует ограничение допустимого диаметра ротора генератора. Зависимости 2 и 3 определяют необходимый диаметр ротора, исходя из мощности и допустимых электромагнитных нагрузок. При мощности генератора 100 кВт (кривая 3) для частот вращения свыше 50 000 мин⁻¹ и 200 кВт (кривая 2) для частот вращения свыше 35 000 мин⁻¹ возникнут проблемы, связанные с механической прочностью ротора.

Для уточненного расчета напряженно-деформированного состояния ротора разработана трехмерная модель для численной реализации в пакетах прикладных программ (например, ANSYS). Модель позволяет определить напряженно-деформированное состояние ротора, контактные давления по поверхностям сопряжения, суммарные перемещения, расчетные зазоры для определения необходимых натягов по поверхностям сопряжения.

При математическом моделировании для заданной частоты вращения переменными параметрами являются: диаметр расточки статора, величина воздушного зазора, радиальная толщина бандажного цилиндра, высота магнитов, материал бандажного цилиндра.

Численные исследования для оценки возможностей создания микротурбогенераторов предельных мощностей показали, что при мощности 100 кВт генератор может быть выполнен на основе стального или титанового бандажа на частоту вращения 30 000 мин⁻¹, поскольку допустимые значения тангенциальных напряжений для стали – 560 МПа, для титана – 490 МПа, для частот вращения 50 000 мин⁻¹ и 100 000 мин⁻¹, требуется выполнять бандажный цилиндр из композитных материалов с допустимой величиной тангенциальных напряжений 1500 МПа, например, из органо-пластика марки ОПЖА/ЭДТ-Н из органожгута Армос 600-А-НК, имеющего прочность при растяжении порядка 2500 МПа.

Численные эксперименты на базе современных расчетных методов и вычислительной техники позволяют задавать размеры и геометрию машины, учитывать нелинейность характеристик материалов, реальное распределение токов и другие факторы, а также выполнять серии расчетов, обеспечивая повышение их надежности и точности при разработке конструкции машины на этапе проектирования и изготовления.

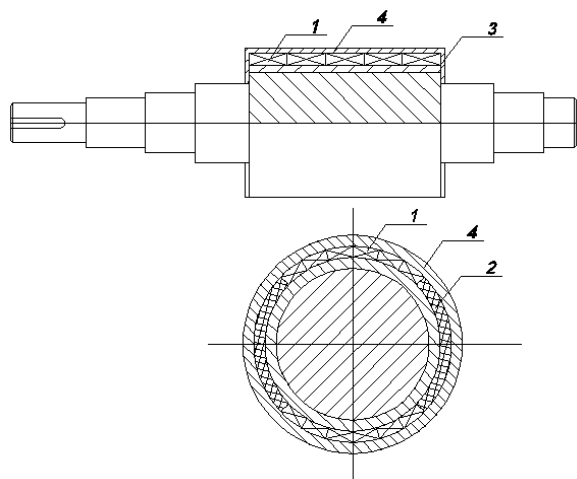


Рис. 2. Конструкция ротора СГПМ.

Магнитная система ротора турбогенератора базовой конструкции (рис. 2) состоит из набора элементарных постоянных магнитов (1), занимающих в окружном направлении две зоны по 120° - 140° , радиальная высота которых определяется требуемым уровнем электромагнитных параметров, а осевые и тангенциальные размеры технологическим возможностям сборки. Наборы элементарных магнитов в окружном направлении разделены немагнитными вставками (2), позволяющими обеспечить необходимое число пар полюсов. Магниты и вставки крепятся на подложке (3) посредством бандажного цилиндра (4), и с торцевых сторон фиксируются запорными кольцами, которые выполнены из материала с низким электрическим сопротивлением, например из меди. Предлагаемая конструкция отличается простотой и надежностью, так как содержит минимально необходимое число элементов.

Для выбора рациональных конструктивных решений разработана комплексная математическая модель. Предварительно выполняются: электромагнитный расчет обмотки статора; расчет магнитной цепи в различных режимах; расчет характеристики холостого хода; угловых и внешней характеристик; вентиляционный и тепловой расчет. Полученные варианты конструкции подвергаются далее уточненному расчету с использованием дополнительных математических моделей для окончательного выбора геометрических размеров магнитной системы ротора:

- 2D модель для определения параметров электромагнитного поля в режимах холостого хода, номинальной нагрузки и короткого замыкания;
- 3D модели для исследования напряженно-деформированного состояния магнитной системы ротора, исходя из критерия прочности для высокооборотных машин.

Выполненные с помощью комплексной математической модели разработки СГПМ различной мощности и частот вращения с использованием базовой конструкции ротора с блоками постоянных магнитов (рис. 2.) стали основой построены размерных параметрических рядов синхронных машин. В качестве базового параметра выбран габарит или высота оси вращения, величина, однозначно связанная с внутренним диаметром статора D_j .

Размерный ряд включает m габаритов и n длин машин в каждом габарите. Произвольно выбранный габарит имеет индекс j , а произвольно выбранная длина индекс k . Размерный параметрический ряд электрических машин построен на ряде j внутренних диаметров статора D_j , возрастающих с увеличением высоты оси вращения, и

ряде k активных длин статора для каждого значения j (генераторы выполняются на одно и то же напряжение и имеют одинаковое число пар полюсов; принято, что с увеличением мощности генератора снижается его частота вращения).

В этом случае любой параметр машины, входящей в размерный ряд, может быть представлен элементом матрицы. Например, для мощности матрица имеет вид:

$$\begin{bmatrix} P_{11} \dots & P_{j1} \dots & P_{m1} \\ P_{1k} \dots & P_{jk} \dots & P_{mk} \\ P_{1n} \dots & P_{jn} \dots & P_{mn} \end{bmatrix}. \quad \text{При обозначении отношения двух соседних диаметров}$$

$a = D_j / D_{j-1}$, отношения двух соседних длин $b = L_{jk} / L_{j(k-1)}$, отношения мощностей $P_{jk} / P_{(j-1)k} = c$ будут пропорциональны отношению диаметров в четвертой степени $c = a^4$.

Получены общие закономерности для построения размерного ряда СГПМ:

$$D_j = a^{(j-m)} D_m; \quad L_{jk} = a^{(j-m)} b^{(k-n)} L_{mn}; \quad P_{jk} = a^{4(j-m)} b^{(k-n)} P_{mn}. \quad (2)$$

Геометрические размеры машины, связанные с диаметром расточки статора (высота паза h_p , ширина магнитов b_m), изменяются так же, как и диаметр, а длина магнита аналогична закономерности изменения активной длины машины. В этом случае закономерность изменения тока статора повторяет закономерность изменения мощности:

$$I_{jk} = a^{4(j-m)} b^{(k-n)} I_{mn}. \quad (3)$$

Если в качестве механического ограничения принять допустимую окружную скорость ротора $V_{rm} = \frac{n\pi D}{60}$ (где D -диаметр ротора), частота вращения генератора (n) будет подчиняться закономерности

$$n_j = a^{-(j-m)} n_m. \quad (4)$$

Закономерность изменения частоты электромагнитного поля будет аналогичной, поскольку число пар полюсов размерного ряда не меняется.

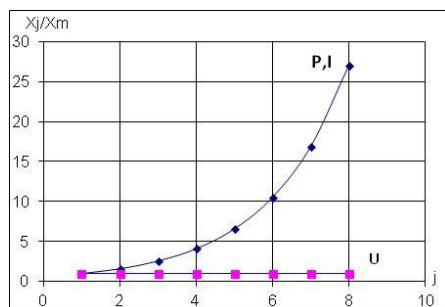
Степень использования машины характеризуется зависимостью изменения электромашинной постоянной Арнольда C_a :

$$C_{a\,jk} = a^{-2(j-m)} C_{a\,mn}. \quad (5)$$

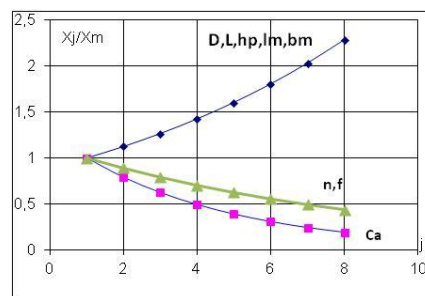
Полученные закономерности сведены в табл. 1 и показаны на рис. 3, а, б. Зависимости построены для случая исполнения размерного ряда на одной длине статора в габарите, наиболее характерном для мини-турбогенераторов МГТУ.

Закономерности связи номинальных данных и геометрических параметров

Номинальные данные				Геометрические размеры	
P, I	U	C_a	n, f	D, h_p, b_m	L, l_m
$a^{4(j-m)} b^{k-n}$	const	$a^{-2(j-m)}$	$a^{-(j-m)}$	a^{j-m}	$a^{j-m} b^{k-n}$



(а)



(б)

Рис. 3. Закономерности изменения номинальных параметров (а) и основных геометрических размеров (б) размерного параметрического ряда.

В табл. 2 приведены закономерности изменения параметров и геометрических размеров рассматриваемого ряда в зависимости от характера нагрузки, когда индукция в зазоре (B_δ), в зубцах статора (B_z) и плотность тока (j_a) остаются постоянными для ряда ($B_\delta = const, B_z = const, j_a = const$), и когда индукция в воздушном зазоре, в зубцах статора и плотность тока для ряда возрастают с увеличением габарита и подчиняются закономерности

$$\frac{B_{\delta jk}}{B_{\delta mn}} = a^{0.5(j-m)}, \quad \frac{B_{zjk}}{B_{zmn}} = a^{0.5(j-m)}, \quad \frac{j_{ajk}}{j_{amn}} = a^{j-m} \quad (6)$$

Таблица 2

Закономерности изменения параметров и геометрических размеров от характера нагрузки для размерного параметрического ряда

Электромагнитные нагрузки		Обмоточные данные статора			Геометрические размеры
A , линейная токовая нагрузка	Φ , магнитный поток	W , число витков	N , число эффек- тивных провод- ников	Z , число зубцов	b_p, b_z, t_z ширина паза, ширина зубца, зубцовое деление
$B_\delta = const; B_z = const; j_a = const$					
$a^{2(j-m)}$	$a^{2(j-m)}$	$a^{-(j-m)}$	a^{j-m}	$a^{-2(j-m)}$	$a^{3(j-m)}$
$\frac{B_{\delta jk}}{B_{\delta mn}} = a^{0.5(j-m)}, \quad \frac{B_{zjk}}{B_{zmn}} = a^{0.5(j-m)}, \quad \frac{j_{ajk}}{j_{amn}} = a^{j-m}$					
$a^{2.5(j-m)}$	$a^{2.5(j-m)}$	$a^{-1.5(j-m)}$	$a^{-0.5(j-m)}$	$a^{-1.5(j-m)}$	$a^{2(j-m)}$

Проведенный анализ закономерностей изменения номинальных данных и основных геометрических размеров параметрического ряда электрических машин показывает:

- закономерностями изменения индукций и плотности тока обмотки статора для рассматриваемого ряда высокооборотных мини-турбогенераторов в зависимости от характера нагрузки являются соотношения (6);
- размерный параметрический ряд может быть построен при условии $Z = const$, но плотность тока обмотки статора для такого ряда должна возрастать значительно с ростом габарита $a^{2(j-m)}$.

Во второй главе рассмотрены способы снижения потерь в высокооборотных электрических машинах – механических потерь от трения бочки ротора о воздух и добавочных потерь во всыпных обмотках. Предложен и проверен принципиально новый способ использования антифрикционных покрытий поверхности ротора для снижения в высокооборотных машинах механических потерь от трения бочки ротора о воздух, пропорциональных третьей степени частоты вращения, и составляющих в СГПМ до 1% полезной мощности. Для экспериментальной проверки эффективности применения различных видов нанокompозитных антифрикционных покрытий для снижения механических потерь от трения о воздух разработана и изготовлена лабораторная модель высокооборотного синхронного генератора.

К антифрикционным покрытиям, применяемым для снижения механических потерь от трения о воздух, предъявляются требования по обеспечению прочности и однородности структуры, гладкости поверхности, исключению высокотемпературной обработки (недопустимой вследствие опасности размагничивания магнитных материалов, находящихся в сборке вместе с покрываемым ротором, при температуре более 150°C). Методами химического синтеза в лабораториях ИХС РАН созданы различные образцы нанокompозитов для обеспечения вышеназванных требований.

В результате физического моделирования на опытной машине (рис. 4) высокооборотного СГПМ мощностью 1,2 кВт, частотой вращения 18 000 мин⁻¹ определены потери холостого хода в зависимости от частоты вращения, и проведены исследования влияния свойств антифрикционных покрытий, нанесенных на поверхность ротора, на снижение уровня механических потерь. Исследуемый диапазон частот вращения составил (9 000-18 000) мин⁻¹.



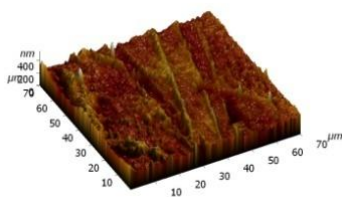
Рис. 4. Испытательный стенд для исследования характеристик высокооборотных машин.

Испытания лабораторного образца синхронного генератора с нанесенными на ротор органосиликатными покрытиями четырех типов показали возможность уменьшения механических потерь от трения о воздух на (4 – 6)% (в диапазоне частот вращения 6 000-18 000 мин⁻¹).

Обеспечение высокого уровня гладкости покрытий было достигнуто при экспериментах с композициями на основе эпоксисилоксанового и эпоксититанатного золь. Исследования морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии

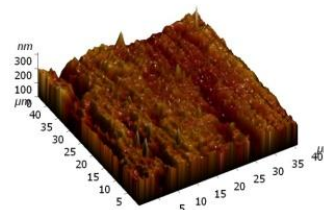
показали, что шероховатость необработанной поверхности образца улучшается на 1-2 класса при применении эпоксититанатного покрытия (рис. 5).

Поверхность без покрытия



(а) Обработка по 10 точкам, Rz 271.7 нм
Обработка по средним величинам, Ra 32.9 нм

Поверхность с покрытием



(б) Обработка по 10 точкам, Rz 143.7 нм
Обработка по средним величинам, Ra 17.8 нм

Рис. 5. Морфология поверхностей без покрытия (а) и с покрытием (б).

Проверена гипотеза о влиянии степени гидрофобности (значения краевого угла смачивания) на снижение механических потерь трения бочки ротора о воздух. Проведены эксперименты с эпоксититанатным, модифицированным фторсодержащим полимером, покрытием - ЭТФ (значение краевого угла смачивания 88° - 91°), супергидрофобным силановым покрытием с гидрофобизированным аэросилом - АЭ (значение краевого угла смачивания 150°), фтортензидным покрытием состава «ВАЛКОН» - ПАВ. Экспериментально установлено, что увеличение гидрофобности не приводит к существенному уменьшению исследуемых потерь. Тип покрытия ЭТ, демонстрирующий перспективный уровень снижения потерь - 12% (по сравнению с предыдущими вариантами покрытий), получен с использованием турмалина. Сравнительные данные, свидетельствующие о влиянии антифрикционных покрытий поверхности ротора на снижение величины механических потерь от трения бочки ротора о воздух в высокооборотных электрических машинах, представлены на рис. 6.

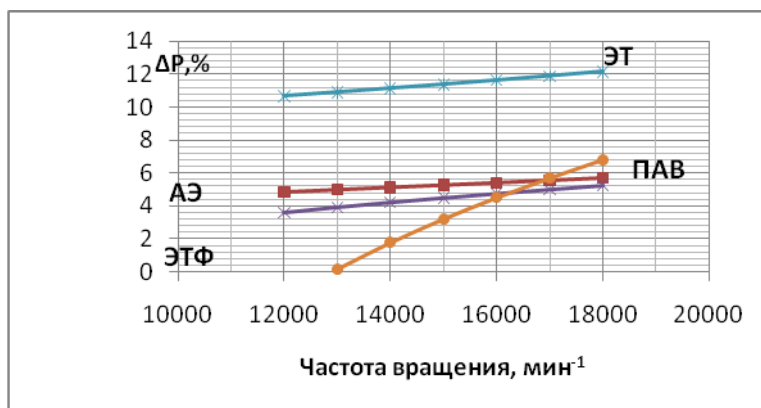


Рис. 6. Расчетные оценки снижения механических потерь от трения о воздух при нанесении на ротор эпоксититанатного фторированного покрытия (ЭТФ), силанового покрытия с гидрофобизированным аэросилом (АЭ), фтортензидного покрытия (ПАВ) и покрытия с турмалином (ЭТ).

В главе разработан метод расчета добавочных потерь на циркуляционные и вихревые токи от поперечных пазовых потоков рассеяния с учетом временных гармоник во вспяной обмотке. При исследовании особенностей проектирования пазовой зоны статора показано, что для асинхронных и синхронных машин малой мощности

целесообразно применение однослойных обмоток, имеющих ряд преимуществ перед двухслойными. Снижение реактивностей X'_D и X''_D для синхронных машин уменьшает «провал» напряжения при внезапных набросах нагрузки в процессе эксплуатации генераторов, что имеет особую актуальности в СГПМ, так как в них исключается возможность форсировки возбуждения в момент наброса нагрузки.

В методе расчета потерь от циркуляционных токов применены следующие допущения: пазы принимаются прямоугольными с усредненным числом элементарных проводников $N_{\text{Ш}}$ по ширине каждого витка и $N_{\text{ВЫС}}$ по его высоте; транспозиция элементарных проводников полностью отсутствует как в лобовой, так и в пазовой частях витка, так что в обеих его сторонах каждый элементарный проводник занимает одно и то же положение в витке.

Рассматривая контур, образованный двумя соседними по высоте слоями проводников, соединенных параллельно, получены расчетные выражения для распределения токов по высоте паза. При аналогичном расчете двухслойных обмоток с числом витков в катушке $S_{\text{ВИТ}} > 1$ учтен поток взаимоиндукции между нижней и верхней катушками двухслойной обмотки.

Коэффициент увеличения потерь, вызванных циркуляционными токами, равен:

$$K_{\text{ЦИРК}} = \frac{\sum |I_N|^2 N_{\text{ВЫС}}}{I_{\text{НОМ}}^2}$$
, где $I_{(N)}$ – токи на осях проводников, занимающих по высоте соответственно номера N ($N = 0; 1; 2; \dots; N_{\text{ВЫС}} - 1$), $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток машины, суммирование ведется по числу проводников N по высоте.

Апробация методики расчета добавочных потерь от циркуляционных токов в однослойной и двухслойной насыщенной обмотке с одним витком в катушке осуществлена численным экспериментом при отладочном расчете по разработанной методике (частота тока 250 Гц и 550 Гц).

Рассмотрены предельные случаи распределения токов по слоям для двухслойной обмотки: в пазу протекают токи разных фаз, противоположные по знаку, или токи, совпадающие по направлению. Численный эксперимент показал, что коэффициент учета потерь от циркуляционных токов достигает максимальных значений при расположении в слоях паза токов одноименной фазы или минимальных значений при протекании по слоям в пазу токов разноименных фаз, что имеет ясное физическое объяснение. Для одной из конструкций обмотки, представляющей интерес, на рис. 7 приведен пример результатов расчета распределения векторов тока в слоях однослойной насыщенной обмотки. Справа – значения этих токов при нумерации со дна паза. Следует отметить, что сумма вещественных частей этих токов равна 100 А (величина тока нагрузки), а сумма мнимых частей равна нулю, что подтверждает справедливость разработанного метода. Полученные результаты подтверждают корректность учета полей рассеяния при определении $K_{\text{ЦИРК}}$ для двухслойной обмотки в предложенной методике расчета добавочных потерь от циркуляционных токов. В практических расчетах обычно принимается, что токи в обеих катушках двухслойной обмотки принадлежат одной фазе. Предложены способы исключения гармоник четных порядков из кривой МДС однослойных обмоток.

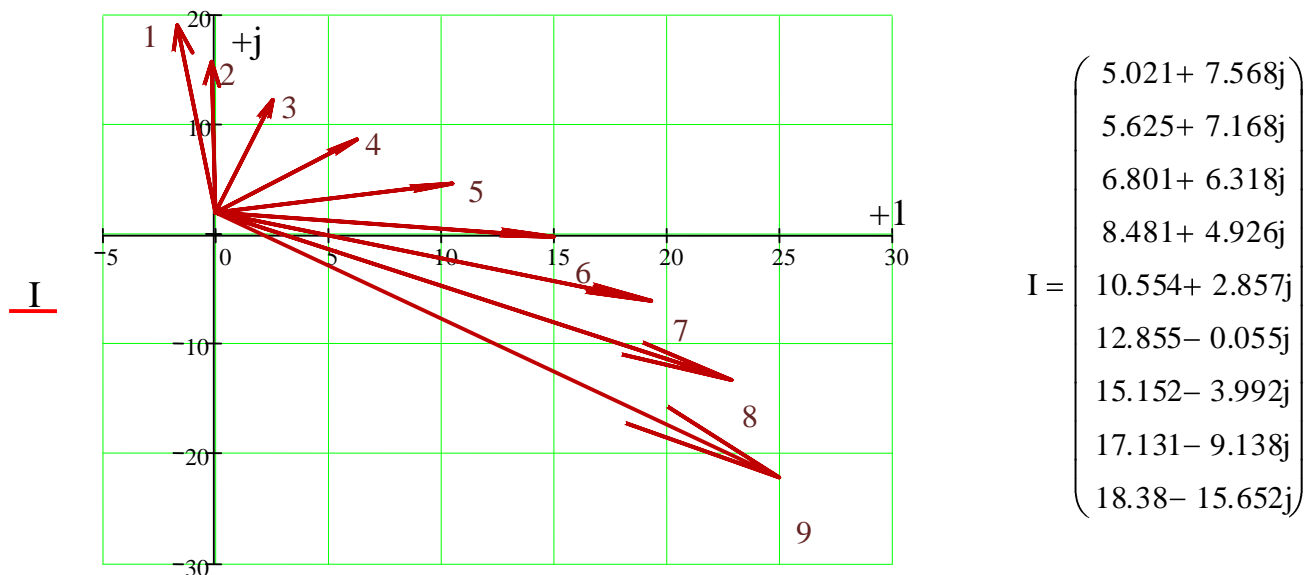


Рис. 7. Векторные диаграммы и значения токов в стержне по слоям при частоте 250 Гц для одно-слойной обмотки. Нумерация слоев 1-9 со дна паза.

В общем случае при сокращении шага обмотки ($\beta \neq 1$) МДС однослойной трехфазной обмотки содержит помимо нечетных гармоник порядков $n = 6k + 1$ и $n = 6k + 5$, также гармоники четных порядков $n = 6k + 4$ и $n = 6k + 2$ (где $k = 0, 1, 2, \dots$).

Возможность появления в кривой МДС статора четных гармоник, вызывает помимо дополнительного нагрева контуров ротора также и повышенные вибрации машины от дополнительных моментов, что обосновывает необходимость разработки способа исключения этих гармоник из МДС обмотки статора. Эти трудности можно устранить, если выбрать число пазов четным и выполнить однослойную обмотку при $\beta \neq 1$ по типу двухслойной. Шаг такой однослойной обмотки должен быть нечетным.

Третья глава посвящена проблеме уточнения расчета сил одностороннего магнитного тяжения ротора синхронной машины при наличии эксцентриситета, приводящего к асимметрии магнитного потока в зазоре машины, появлению вибраций. Эти силы могут достигать значительных величин, и имеют решающее значение при выборе магнитных подшипников, особенно, в высокооборотных машинах малой и средней мощности, в том числе в СГПМ. Обеспечение требований выбора магнитных подшипников выдвигает постановку задач, связанных с исследованием влияния величины эксцентриситета ротора при малых зазорах на уровень радиального магнитного тяжения в синхронных машинах при эксплуатации.

В заводской практике для расчета усилий используют общепринятую методику, описанную В.П. Шуйским, основанную на расчете усилий по первой гармонике индукции поля в зазоре в режиме холостого хода.

Для практического использования высокооборотных машин, особенно для машин малой мощности, требуется уточнение метода расчета радиальных усилий магнитного тяжения с учетом дополнительных факторов, вызванных: эксцентриситетом ротора, зубчатой конструкцией статора, расположением магнитов (для СГПМ), влиянием формы полюсного наконечника (для явнополюсных синхронных машин), насыщением магнитной цепи.

Численными методами (методом конечных элементов) исследованы на 2D моделях магнитные поля при наличии эксцентриситета ротора в ряде явнополюсных синхронных машин (4, 6, 8-полюсных) и СГПМ (2-полюсные). Моделировался режим холостого хода с учетом реальной геометрии магнитопровода, нелинейными характеристиками материалов при величине эксцентриситета от 0 до 10% величины воздушного зазора. Поле создавалось обмоткой возбуждения ротора. Результаты расчета усилий для явнополюсных синхронных машин в режиме холостого хода при максимальном эксцентриситете $e=10\%$, полученные аналитически и с помощью полевых методов для указанных выше машин, рассчитанные по первой гармонике, выделенной из результирующей кривой индукции, дают расхождение порядка 15-20%.

Особенностью расчета СГПМ исследуемой конструкции (рис. 2) является то, что при наличии немагнитного бандажного цилиндра ротора механический зазор оказывается значительно меньше расчетного зазора, по которому определяется кривая индукции, а, следовательно, величина эксцентриситета, определенная относительно механического зазора для расчетного зазора, будет в 3-4 раза меньше. Расчетные данные свидетельствуют, что результаты аналитического решения для СГПМ отличаются от результатов полевого расчета, тем больше, чем больше уровень насыщения машины, что требует выполнения расчетов усилий магнитного тяжения в полевой постановке. Для рассмотренных вариантов СГПМ (мощностью 6 000 кВт, частотой вращения $12\ 000\ \text{мин}^{-1}$, и мощностью 250 кВт, частотой вращения $48\ 000\ \text{мин}^{-1}$) расхождения в результатах расчета усилий аналитическим и полевыми методами составляют 9-13%.

При нагрузке результирующее магнитное поле смещается, максимальные радиальные усилия располагаются не по продольной оси, а сдвинуты на угол нагрузки θ . Предложен метод расчета усилий магнитного тяжения, особенностью которого является то, что он предусматривает определение результирующего поля в зазоре учетом реальной геометрии машины и характеристик материалов при холостом ходе и под нагрузкой методом конечных элементов, и может быть использован для явнополюсных, неявнополюсных машин, СГПМ.

Распределение индукции результирующего поля вдоль расточки статора используется для вычисления радиальных усилий тяжения, а также их компонент, при возникновении эксцентриситета. Величины усилий магнитного тяжения при нагрузке для рассмотренных вариантов явнополюсных синхронных машин получены несколько меньше, чем в режиме холостого хода. Практически для ориентировочных расчетов величины одностороннего магнитного тяжения ротора высокооборотной синхронной машины при ее нагрузке поправочный коэффициент (корректирующий результат расчета усилий по общепринятой методике по сравнению с полевым расчетом), составляет величину порядка 1,1-1,2. Метод может быть распространен на высокооборотные синхронные машины, отличающиеся от машин промышленной частоты малыми зазорами. Значения усилий радиального магнитного тяжения, рассчитанные в интервале величин эксцентриситета (0 – 10)% от величины воздушного зазора для нескольких исследованных машин, линейно зависят от величины эксцентриситета ротора. Для выбора и заказа необходимых магнитных подшипников целесообразно провести расчеты усилий магнитного тяжения как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой, поскольку должна быть предусмотрена возможность работы машины в обоих режимах. Однако для оценки габаритов машины достаточно рассчитать уси-

лия одностороннего магнитного тяжения в режиме холостого хода по общепринятой заводской методике.

В четвертой главе рассмотрены особенности создания низкооборотных СГПМ, применяемых в ветро и-гидроэнергетике, в связи с созданием ветроустановки с карусельной турбиной, низкооборотным генератором и безредукторным приводом.

Исследовано влияние расположения магнитов на характеристики электрической машины. Известно, что низкооборотные СГПМ могут выполняться:

- с радиальным расположением постоянных магнитов на поверхности ротора,
- с тангенциальным расположением магнитов в пазах ротора,
- дисковой конструкции с аксиальным магнитным потоком.

Последние, как правило, имеют ограничение по величине реализуемой мощности. В работе обоснован выбор расположения магнитов в СГПМ в зависимости от частоты вращения.

Постановка задачи следующая: два генератора (величины мощности P , число пар полюсов $2p$ и частоты вращения n представлены в табл. 3) имеют одинаковые значения диаметра расточки (550 мм), активной длины статора (56 мм), обмоточные данные. Оценка конструктивного исполнения заключается в поиске объемов постоянных магнитов, необходимых для реализации номинальных данных генераторов.

При принятых условиях сравнения при радиальном и тангенциальном расположении магнитов генераторы имеют одинаковые значения магнитного потока в зазоре. В табл. 3 приведены число зубцов Z , число витков обмотки статора w , расчетные значения высоты (h_m), ширины (b_m), объемов (V_m) магнитов при радиальном и тангенциальном их расположении.

Таблица 3

Сравнение геометрических размеров и объемов магнитов при радиальном и тангенциальном расположении магнитов для вариантов низкоскоростного ветрогенератора

Величина	Радиальное расположение	Тангенциальное расположение	Радиальное расположение	Тангенциальное расположение
P , кВт/	5		2	
n , мин ⁻¹	150		75	
$2p / Z$	40/42		80/81	
w	560	560	1080	1080
h_m , мм	6	6	6	3
b_m , мм	32,7	26	16,3	13
V_m , см ³	11,0	8,74	6,37	2,18
V_{mt}/V_{mr}		0,79		0,34

Сопоставление результатов расчета поля, представленных на рис. 8, показывает преимущество тангенциального расположения магнитов, когда магниты работают параллельно, в отношении более равномерного распределения индукции по расточке. Вторым преимуществом тангенциального расположения магнитов для многополюсной машины является меньший объем магнитов, требуемый для достижения необходимого результата. Установлено, что чем меньше частота вращения синхронного ветрогенератора, тем предпочтительнее становится конструкция с тангенциальным расположением магнитов.

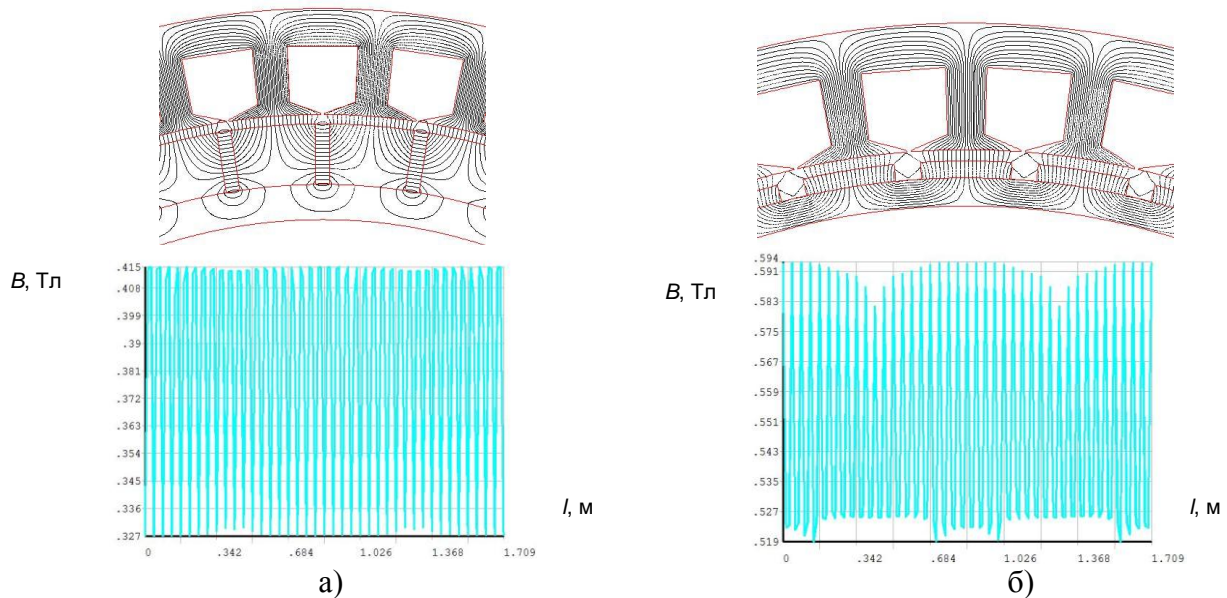


Рис. 8. Силовые линии поля и распределение индукции B по расточке статора при тангенциальном расположении магнитов а) и при радиальном расположении магнитов б) (l - расстояние вдоль расточки статора).

В главе приведены результаты разработки низкооборотного ветрогенератора для опытного образца карусельной ветротурбины - СГПМ мощностью 10 кВт, частотой вращения 150 мин^{-1} , спроектированного с тангенциальным расположением магнитов. Для создания ветроустановок различных габаритов и мощностей показана возможность разработки размерного параметрического ряда низкооборотных ветрогенераторов, построенного на заданной расточке статора 550 мм, трех длинах сердечника (56 мм, 84 мм и 112 мм) и трех частотах вращения ($75, 150$ и 300 мин^{-1}). Данный размерный параметрический ряд позволяет соответственно реализовать мощности при частоте вращения 75 мин^{-1} 2,0; 3,5 и 5,0 кВт, при частоте вращения 150 мин^{-1} 5,0; 12,0 и 18,00 кВт, при частоте вращения 300 мин^{-1} 14,0; 22,0 и 27,0 кВт (рис.9.). Закономерности построения размерных параметрических рядов высокооборотных и низкооборотных СГПМ одинаковы.

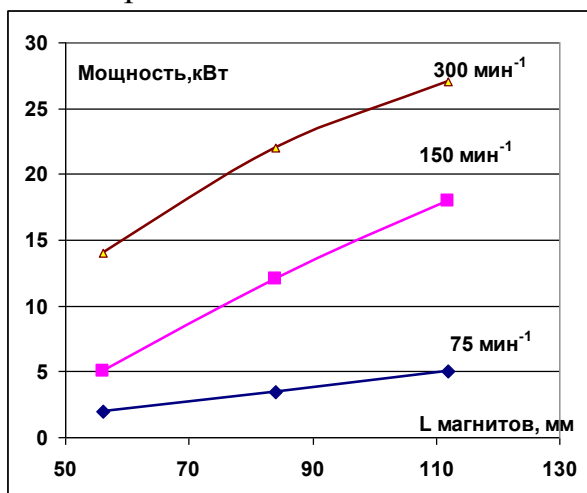


Рис. 9. Реализуемые при различных частотах вращения мощности СГПМ

Опыт разработки и изготовления ветровой турбины с вертикальным валом и СГПМ мощностью 10 кВт изложен в Приложении. На макетах осуществлялся поиск рациональной конфигурации ветротурбины. Исследована модель – 6-лопастная с 12-

ю направляющими плоскостями. Предложен вариант контрроторной ветротурбины, имеющей ряд преимуществ по безопасности, уровню вибрации, снижению нагрузки на фундамент, и проведены экспериментальные исследования на действующих моделях. Достигнут экономически приемлемый коэффициент использования ветра – 0,37-0,41. Даны прогнозные оценки - зависимости геометрических размеров и мощности от скорости ветра.

В пятой главе дан анализ известных методов расчета асинхронных машин с массивным ротором. Основной задачей разработки методов расчета электрических машин с массивным ротором является создание инженерных методов расчета рабочих характеристик машины, адекватно учитывающих факторы, влияющие на основные показатели электрической машины.

В приближенных аналитических методах исследования расчет магнитного поля в установившихся режимах проводится в линейном приближении с допущениями о постоянстве магнитной проницаемости материала ротора и статора. Результаты применения линейной теории плохо согласовывались с экспериментом из-за сильного влияния неучтенной в данной постановке задачи магнитной нелинейности материалов ротора. Проблема учета насыщения стала ключевой задачей в разработке инженерных методов расчета полей. На основе известных соотношений Л.Р. Неймана были определены кривые зависимостей параметров схемы замещения машины, эквивалентирующих массив ротора, от частоты и эквивалентного тока ротора, разработан метод решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений, метод магнитных схем замещения, метод проводимости зубцовых контуров, метод магнитосвязанных контуров, сочетающий теорию поля и теорию цепей. Большинство разработанных математических моделей асинхронной машины основаны на описании электромагнитных процессов в двумерном пространстве дифференциальными уравнениями в векторной форме, требуют введения ряда допущений, действующих в определенном диапазоне мощностей, соотношении геометрических размеров, упрощающих физические процессы распространения электромагнитной волны в проводящей среде. В практике методы расчета, использующие эти допущения, обычно корректируются рядом эмпирических коэффициентов, полученных при стендовых испытаниях определенного типа машин.

Общим методом расчета режимов асинхронных машин с массивным ротором является расчет двигателей с вторичным контуром в виде эквивалентной короткозамкнутой клетки.

Одно из аналитических решений, предложенное В.С. Могильниковым и др. получено при рассмотрении цилиндра, растянутого в бесконечную плоскость. Используется Г-образная схема замещения асинхронного двигателя, включающая поправочный коэффициент для определения эквивалентных параметров ротора. При расчете эквивалентных сопротивлений ротора значение магнитной проницаемости материала ротора μ_r в пространстве принято постоянным и учтена только зависимость μ_r от тока ротора как функция скольжения двигателя. Поперечный краевой эффект учитывается коэффициентом ослабления мощности, рассчитанным в предположении, что ротор эквивалентен тонкой гильзе с бесконечно большими вылетами.

Современным методом расчета электромагнитных полей, свободным от многих ограничений, является численное моделирование с использованием пакетов прикладных программ, базирующихся на методе конечных элементов.

При численном моделировании плоскопараллельного магнитного поля учитывается влияние всего спектра гармоник поля на рабочую характеристику машины, реальная геометрия машины, обмоточные данные и характеристики материалов статора и массивного ротора. Векторный магнитный потенциал имеет только одну составляющую вдоль оси Z , которая совпадает с осью вращения. Исходными данными для моделирования являются геометрические размеры статора и ротора, удельное электрическое сопротивление материалов ротора, кривые намагничивания для статора и ротора $B = f(H)$.

Вращающий электромагнитный момент на единицу аксиальной длины определяется по формуле:

$$\overline{M} = \int_s \overline{r} \times \overline{J}_r \times \overline{B} ds, \quad (7)$$

где \overline{r} - радиус-вектор положения точки от продольной оси двигателя до поверхности интегрирования, \overline{J}_r - вектор плотности тока ротора, \overline{B} - вектор магнитной индукции, соответствующий радиус-вектору \overline{r} , s - площадь поверхности интегрирования. По распределению наведенной плотности тока в поперечном сечении ротора определены интегральные величины: потери в роторе, ток в массивном роторе, электромагнитный момент. Момент на валу двигателя определялся за вычетом потерь.

Данный подход - моделирование численными методами на 2D моделях - применён для оценки возможностей влияния свойств материалов и особенностей конструкции на энергетические характеристики асинхронных двигателей малой мощности с массивным ротором (АДМР).

Результаты исследований рабочих характеристик АДМР мощностью 12 кВт и 3150 кВт выявили предпочтительные материалы с определенным соотношением удельного электрического сопротивления и магнитной проницаемости материала ротора и конструктивные исполнения массивного ротора, существенно влияющие на улучшение их энергетических характеристик. Анализ расчетных данных АДМР с тремя вариантами материала ротора (сталь 3, железомедные сплавы СМ20 и СМ25) показал преимущества применения СМ25 для повышения КПД по сравнению с исходным ротором (сталь 3) на 27-28%. Наличие шлицов на роторе (в модели ротора рациональное отношение ширины паза к глубине составляет 7-8, при числе шлицов 38) повышает КПД и $\cos\varphi$ двигателя с массивным ротором примерно на 10-11%. Двухслойная конструкция ротора обладает наилучшими энергетическими показателями, например, повышает КПД двигателя мощностью 3150 кВт с 73% до 78%, в большей степени влияя на $\cos\varphi$, увеличивая его на 25%.

Сравнение данных численного моделирования, полученных при исследовании характеристик синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), имеющего более высокие энергетические показатели, и АДМР показывает, что такие преимущества АДМР, как высокий пусковой момент, меньшие нагревы при пуске, простота и технологичность конструкции, особенно для высокооборотных машин, а, следовательно, и более низкая стоимость позволяют им быть перспектив-

ным вариантом в ряде практических применений при рациональном подборе материалов ротора и конструктивного исполнения двигателя с целью получения улучшенных энергетических показателей. Перспективы повышения КПД связаны с возможностями влиять на величину удельного электрического сопротивления сплавов при сохранении магнитных характеристик или при одновременном изменении магнитной проницаемости. Моделирование ряда вариантов асинхронного двигателя с двухслойным ротором мощностью 3150 кВт с различными значениями удельных электрических сопротивлений материала ротора подтвердило возможность увеличить его КПД с 78% до 86%. При этом величина удельного электрического сопротивления должна быть снижена более, чем в два раза ($0,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) при сохранении магнитных свойств, характерных для сплава СМ-25.

Энергетические показатели АДМР сильно зависят от распределения токов по массиву ротора. Для машин небольшой длины, в которых отношение длины активной части ротора к полюсному делению $L/\tau \sim (0,8 - 1,8)$, актуальным становится вопрос учета реального распределения электромагнитного поля в массиве ротора по длине машины и процесс замыкания токов ротора по торцам.

Учесть конечную длину ротора и выявить влияние на КПД и $\cos\varphi$ наличия таких конструктивных элементов как короткозамыкающие торцевые кольца можно только при решении трехмерной задачи расчета поля. Разработанная упрощенная модель позволяет оценить изменение величины электромагнитного момента при наличии короткозамкнутых торцевых колец и учесть усредненно неравномерность распределения магнитной проницаемости материала ротора μ_r по массиву. Для этого ротор в трехмерной задаче разделен на кольцевые зоны, в каждой из которых задано постоянное в пределах зоны усредненное значение μ_r , определенное из решения двумерной нелинейной задачи расчета поля численным методом. В пределах указанных зон расчетная величина μ_r постоянна по длине машины. Ввиду больших ресурсных и временных затрат такая модель применима для прогнозных оценок. Принципиально наличие торцевых короткозамыкающих колец приводит к увеличению электромагнитного момента. Данные, сопоставляющие точность расчета 2D и 3D решения, свидетельствуют о необходимости разработки более корректного расчетного метода для учета особенностей протекания электромагнитных процессов в АДМР.

Указанные выше преимущества АДМР пока еще не приводят к рекомендациям по широкому применению этого типа машин, так как проблемы повышения их энергетических параметров не решены, и, в первую очередь, недостаточно разработаны методы исследования. Наиболее простым конструктивным исполнением является массивный ротор, но в конструкции ротора могут присутствовать стержни, шлицы, короткозамыкающие кольца, многослойность. Все эти проблемы охватываются методом, предложенным в работе, открывающим возможности исследования целого класса конструкций.

В шестой главе разработана новая математическая модель, основанная на решении комбинации задач теории цепей и электромагнитных полей на базе обобщения одного из современных методов расчета магнитосвязанных контуров, разработанного для асинхронного двигателя с короткозамкнутым или фазным ротором. Использована Т-образная схема замещения асинхронной машины, в которой первичный контур представлен полным сопротивлением обмоток статора, намагничивающий контур –

двумя параллельными цепями, одна из которых соответствует потерям в стали статора, потерям холостого хода, (в том числе механическим), вторая – току намагничивания. Параметры вторичного контура (сопротивления ротора) приведены к первичному контуру.

Задача расчета рабочих характеристик АДМР различных конструкций в эксплуатационных режимах решена здесь с учетом:

- распределения магнитной проницаемости $\mu = \mu(X, Y, Z) \neq const$, так как поток взаимной индукции в зазоре распределен вдоль полюсного деления τ неравномерно;
- распределения индукции результирующего поля в зазоре по гармоническому закону $b_{\delta}(X, t, m) = B_{\delta} \cdot \exp j \cdot (\omega_{rot} t - 2 \pi \cdot m \cdot X/T)$; (8)

X - координата вдоль расточки статора ($X = R \cdot \beta$, R – радиус по расточке статора, β угол в цилиндрической системе координат); ω_{rot} - частота ЭДС и тока ротора; t – время; m – порядок пространственной гармоники статора; $T = 2\tau$ – период. Соответственно, проводящий слой ротора не может быть охарактеризован единственным значением глубины проникновения $\Delta(\gamma, \mu, \omega_{rot})$, так как $\Delta(\gamma, \mu, \omega_{rot}) = \Delta(\rho, \beta, Z)$, где γ – удельная проводимость материала ротора, ρ – радиус - вектор, Z - координата вдоль оси вращения машины;

- значений осевой (вдоль оси машины) составляющей тока ротора частотой ω_{rot} , протекающего в проводящем слое ротора, задания соответствующих γ материалов.

Особенностью разработанной модели является то, что она состоит из двух основных этапов:

- решения системы уравнений поля в активных элементах магнитной цепи машины с целью определения функции вида $F_{rot} = f(B_{\delta})$, где F_{rot} – первая гармоника магнитодвижущей силы МДС ротора;
- определения электромагнитных нагрузок в активной части машины с целью получения решения нелинейного уравнения вида:

$$U_{расч} = f(B_{\delta}),$$

при условии, что

$$\left| \frac{U_{расч}}{U_{\phi}} - 1 \right| \leq \varepsilon$$

где $U_{расч}$ - текущее значение фазного напряжения на выводах машины, U_{ϕ} - заданное значение фазного напряжения.

Из решения системы уравнений для магнитосвязанных контуров асинхронной машины с учетом насыщения магнитной цепи и поверхностного эффекта в контурах ротора определяются электромагнитные нагрузки электрической машины. Для пространственной гармоники $m = 1$ система имеет следующий вид:

$$\Phi_{\delta} = \frac{2}{\pi} \tau L B_{\delta}, \quad (9)$$

$$E_{rot} = -j \cdot \omega_{rot} \cdot W_{rot} K_{Wrot} \cdot \Phi_{\delta}, \quad (10)$$

$$F_0 = F_0 \Phi_{\delta} \quad (11)$$

$$|I_{\text{АКТ}}| \approx \frac{P_{\text{АКТ}}}{1,5|E_{\text{stat}}|}, \quad (12)$$

$$|F_{\text{АКТ}}| = \frac{m_{\Phi}}{\pi p} \cdot W_{\text{stat}} \cdot K_{W\text{stat}} \cdot |I_{\text{АКТ}}|, \quad (13)$$

$$F_0' = |F_0| \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)} + |F_{\text{АКТ}}| \cdot e^{j\omega t}, \quad (14)$$

$$Z_{\text{rot}} \approx \frac{E_{\text{rot}}}{I_{\text{rot}}}, \quad (15)$$

$$F_{\text{rot}} = \frac{m_{\Phi}}{\pi p} \cdot W_{\text{rot}} \cdot K_{W\text{rot}} \cdot I_{\text{rot}}, \quad (16)$$

$$F_{\text{stat}} = F_0' - F_{\text{rot}}, \quad (17)$$

$$I_{\text{stat}} = \frac{F_{\text{stat}} \cdot \pi p}{m_{\Phi} W_{\text{stat}} K_{W\text{stat}}}, \quad (18)$$

$$E_{\text{stat}} = -j \cdot \omega_{\text{stat}} \cdot W_{\text{stat}} \cdot K_{W\text{stat}} \cdot \Phi_{\delta}, \quad (19)$$

$$U_{\Phi} = I_{\text{stat}} \cdot Z_{\text{stat}} - E_{\text{stat}}, \quad (20)$$

$$|U_{\Phi}| \approx |U_{\Phi(\text{СЕТЬ})}|, \quad (21)$$

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re } P_{\text{stat}}}{|F_{\text{stat}}|}, \quad (22)$$

$$P_{(\text{СЕТЬ})} = 1,5 \cdot |I_{\text{stat}}| \cdot |U_{\Phi}| \cdot \cos \varphi, \quad (23)$$

где B_{δ} – амплитуда индукции в зазоре соответственно потоку взаимоиндукции Φ_{δ} ; E_{stat} , E_{rot} – соответственно амплитуды ЭДС обмотки статора и ротора; $I_{\text{АКТ}}$, $F_{\text{АКТ}}$ – соответственно ток и МДС активной составляющей тока холостого хода; $H = H(B)$ – кривая намагничивания массива ротора; I_{stat} , I_{rot} – соответственно ток в обмотке статора и ротора; $F_0 = F_0(\Phi_{\delta})$ – характеристика холостого хода машины; F_{stat} , F_{rot} – соответственно МДС обмотки статора и ротора; m_{Φ} – число фаз обмотки статора; W_{rot} , $K_{W\text{rot}}$ – соответственно число витков обмотки ротора и ее обмоточный коэффициент; R – радиус расточки статора; W_{stat} , $K_{W\text{stat}}$ – соответственно число витков обмотки статора и ее обмоточный коэффициент; $P_{\text{АКТ}}$ – потери при холостом ходе машины, основные и добавочные потери в стали и механические потери; $P_{(\text{СЕТЬ})}$ – мощность, потребляемая двигателем из сети; Z_{stat} , Z_{rot} – соответственно сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора. В системе уравнений (9-23) индукция, токи, потоки, ЭДС, МДС, напряжения представлены в комплексной форме.

Эта система уравнений широко используется в инженерной практике при расчете мощных асинхронных двигателей с фазными и короткозамкнутыми роторами.

Особенность ее состоит в том, что в промышленных асинхронных двигателях токи в обмотках протекают в осевом направлении, создавая результирующее поле в зазоре и вращающий момент машины. Соответственно, применительно к асинхронным двигателям с массивным ротором, обозначение I_{rot} относится к осевой составляющей тока.

Определяющей при решении системы уравнений является индукция B_δ . При решении проблемы расчета рабочих характеристик машины с массивным ротором необходимо учесть, что каждый элемент массивного ротора характеризуется определенным уровнем насыщения, поэтому массивный ротор может характеризоваться только интегральным значением сопротивления согласно (15), которое пропорцио-

нально отношению $K_{rot} = \frac{B_\delta}{F_{rot}}$ и зависит от насыщения магнитопровода. Величины и

распределение токов, индуктированных в элементах массива ротора полем взаимои-
 ндукции с амплитудой B_δ , могут быть найдены путем численного решения нелиней-
 ной системы уравнений для векторов напряженности магнитного поля H , электриче-
 ского поля E , плотности тока δ , магнитной индукции B :

$$rot E = -j \cdot \omega_{rot} \cdot B; \quad rot H = \delta; \quad \delta = \gamma \cdot E; \quad H = H \text{ (вектор)} \quad (24)$$

Применительно к исследуемым машинам последовательность вычислений для получения рабочих характеристик асинхронного двигателя с массивным ротором на базе использования системы уравнений (9) – (23) и пакета прикладных программ ANSYS может быть представлена следующим образом.

Для каждого значения скольжения:

1. Задается первая гармоника индукции результирующего поля в зазоре B_δ по величине и фазе. Индукция B_δ имеет в зазоре только радиальную составляющую, перпендикулярную к поверхности ротора.

2. Определяются поток взаимои-
 ндукции и ЭДС с использованием представлен-
 ных уравнений (9) – (10), при этом параметры вторичного контура (ротора) приво-
 дятся к первичному контуру (статора) для обеспечения условия $E_{stat} = E'_{rot}$. При ма-
 лых зазорах, характерных для машин рассматриваемого типа, ЭДС в обмотках стато-
 ра индуцируется радиальной составляющей потока.

3. Определяется первая гармоника МДС ротора по величине и фазе. Для этого бочка ротора подразделяется на участки - диски в осевом направлении и сектора в тангенциальном. Для каждого диска определяется результирующая ступенчатая функция осевого тока ротора или кривая МДС этого тока.

4. Ступенчатая функция тока ротора для каждого диска разлагается в гармониче-
 ский ряд Фурье и определяется амплитуда первой гармоники МДС этого элемента
 ротора (временной комплекс) по величине (модулю) и фазе.

5. Результирующая МДС ротора ($F_{пр,1}, \dots, F_{пр,Q}$) составляет

$$F_{rot} = \frac{1}{Q_L} \cdot F_{пр,1} + F_{пр,2} + F_{пр,3} + \dots + F_{пр,Q_L} \quad , \quad (25)$$

где Q_L - количество разбиений на диски равной толщины по длине ротора (МДС - комплексные величины).

Соответственно из уравнений системы определяется и эквивалентный ток фазы ротора по величине (модулю) с той же фазой, что и МДС. Приведенное к статору значение обозначено I'_{rot} .

6. Определяются параметры вторичного контура, используя выражение $E_{stat}=E'_{rot}$ и выражение для I'_{rot} .

$$Z'_{rot} = \frac{E'_{rot}}{I'_{rot}} = \frac{r'_{rot}}{s} + jx'_{rot}, \tag{26}$$

где $\frac{r'_{rot}}{s}$ - эквивалентное активное сопротивление вторичного контура (ротора), приведенное к первичному контуру (обмотке статора), x'_{rot} - эквивалентное индуктивное сопротивление вторичного контура (ротора), приведенное к первичному контуру (обмотке статора), вычисленное при частоте сети (E'_{rot} , I'_{rot} - комплексные величины).

7. Определяются активные потери в роторе из соотношения

$$Q_{rot} = m_1 |I'_{rot}|^2 \cdot r'_{rot}, \tag{27}$$

электромагнитная мощность $P_{em} = m_1 |I'_{rot}|^2 \frac{r'_{rot}}{s}$, мощность на валу

$$P_{вал} = m_1 |I'_{rot}|^2 \cdot r'_{rot} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \text{ и моменты.}$$

Полученные выражения являются первыми приближениями для определения режима работы АДМР. Для получения окончательных результатов необходимо решить задачу по распределению тока в цепной схеме методом итераций по критерию

$$\text{сходимости } \left| \frac{U_{расч}}{U_{\phi}} - 1 \right| \leq \varepsilon.$$

Благодаря применению трехмерной модели можно оценить рациональность конструкции ротора, введя коэффициент, равный отношению потерь в роторе, рассчитанных по осевой составляющей тока ротора (27), к полным потерям в роторе, рассчитанным в пакете прикладных программ по токам ротора, наведенным от токов статора. Этот коэффициент находится в пределах от 0,6 до 1. При увеличении осевой длины машины он будет увеличиваться. Способами повышения рациональности конструкции является также применение многослойной конструкции ротора, наличие проводящих короткозамыкающих торцевых колец, заваривание в ротор стержней и т.п. Практическая реализация метода расчета рабочих характеристик АДМР имеет особенности. Активная длина ротора L разделена в осевом направлении на ряд участков - дисков. Значения амплитуд МДС ротора максимальны для участков средней части ротора, где ток имеет практически только осевую составляющую. По торцам ротора они минимальны, так как ток имеет практически только ортогональную составляющую. В тангенциальном направлении ротор разделяется на сектора (рис. 10, а). Токи в секторах сосредоточены вдоль оси. Сектора моделируют короткозамкнутую обмотку, пазы. Для определения степени дискретизации модели ротора разработаны подпрограммы выбора числа расчетных зон в тангенциальном и осевом направлениях. Ротор подразделяется на сектора в соответствии с выбором числа секторов

(к) из условия 2% погрешности расчета величины МДС ротора (10, б), что равноценно определению усредненной МДС первой гармоники поля при суммировании по дискам.

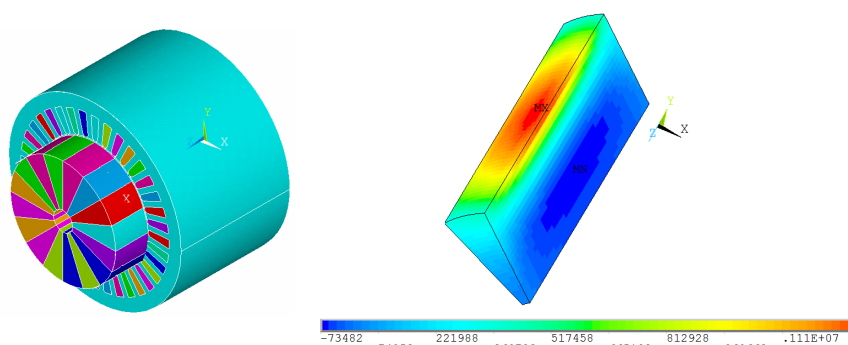


Рис. 10 (а). 3D модель АДМР с дискретизацией в тангенциальном направлении. Распределение токов в секторе ротора.

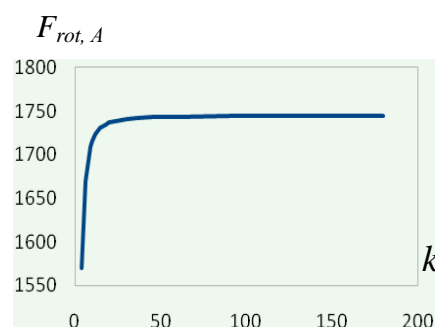


Рис. 10(б). Зависимость величины МДС ротора (F_{rot}) от выбора числа секторов (k).

Выбор числа дисков осуществляется в соответствии с (23) путем увеличения их числа до обеспечения точности, аналогичной для выбора секторов.

Численная реализация предложенной математической модели позволяет оценить рациональность конструкций ротора, исследовать рабочие характеристики АДРМ, представляющих практический интерес, благодаря учету конечной длины машины, нелинейности магнитной цепи, удельной проводимости материала ротора, особенностей распределения токов в массиве ротора.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Работа направлена на развитие научных основ разработки новых модификаций высокоиспользованных электрических машин для современной автономной энергетики, перспективных для применения в составе эффективных энергетических микрогазотурбинных установок, ветростанций и микроГЭС, нефтедобывающей промышленности и других направлений практического использования. В основу исследований положено создание новых и уточнения известных аналитических методов расчета параметров, рабочих характеристик, потерь, электродинамических усилий, а также применение численных методов для определения электромагнитных полей и напряженно-деформированного состояния основных узлов электрической машины.

2. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований для синхронных генераторов с постоянными магнитами и асинхронных двигателей с массивным ротором. Разработанные научные подходы к решению проблем и полученные практические результаты могут быть распространены на любой тип электро-механических преобразователей энергии.

3. В процессе выполнения исследований разработаны новые математические модели на основе численных методов теории упругости для определения рациональной геометрии и сборки, обеспечивающей требуемую монолитность конструкции магнитной системы ротора высокооборотных синхронных машин с постоянными магнитами, которые использованы при проектировании ряда машин различных мощностей и частот вращения. Сформулирован подход к конструированию активной зоны ротора в низкооборотных синхронных машинах на основе выбора способа рас-

положения магнитов ротора в зависимости от частоты вращения, влияющего на объем постоянных магнитов, необходимых для создания устройств с заданными номинальными параметрами.

Модели прошли верификацию на лабораторных и опытно-промышленных образцах.

4. Получены закономерности построения размерных параметрических рядов высокооборотных и низкооборотных синхронных генераторов с постоянными магнитами, определены рациональные электромагнитные характеристики рядов в диапазоне изменения определяющих параметров.

5. Осуществлена оценка влияния свойств материалов массивного ротора асинхронных двигателей; бандажного цилиндра, стали статора, геометрии активной зоны ротора с постоянными магнитами синхронных генераторов на энергетические показатели электрических машин. Сформулированы требования к материалам, обеспечивающие заданные показатели электрических машин при их использовании. Предложен принципиально новый метод снижения механических потерь от трения бочки ротора о воздух в высокооборотных машинах за счет применения новых разработанных материалов, представляющих собой антифрикционные покрытия поверхности ротора, подтвержденный комплекс оригинальных экспериментальных исследований модели синхронной машины с постоянными магнитами в широком диапазоне частот вращения (9000-18000 мин⁻¹). В результате установлено влияние свойств покрытий поверхности ротора на величину механических потерь от трения ротора о воздух и возможности их уменьшения.

6. Разработаны новые и более общие по сравнению с существующими методы исследований электромагнитных полей в синхронных и асинхронных машинах:

- метод определения рабочих характеристик асинхронных двигателей с массивным ротором на базе обобщения одного из современных способов расчета магнитосвязанных контуров, применяемого для асинхронных двигателей с короткозамкнутым или фазным ротором, основанный на комбинации задач теории цепей и электромагнитных полей, что позволяет более глубоко раскрыть сущность происходящих в массивных элементах конструкции физических процессов;

- метод расчета добавочных потерь от циркуляционных и вихревых токов во всыпных обмотках статора, вызванных поперечными пазовыми потоками рассеяния с учетом временных гармоник;

- метод расчета радиальных сил магнитного тяжения при наличии эксцентриситета ротора в синхронных машинах в режиме холостого хода и под нагрузкой с учетом высших пространственных гармоник.

7. Разработанные методы позволяют определять рабочие характеристики асинхронных двигателей с массивным ротором с любыми конструктивными особенностями с учетом характеристик применяемых материалов; оценить величину добавочных потерь во всыпных обмотках статора; уточнить величины усилий радиального магнитного тяжения с учетом уровня насыщения магнитной цепи при выполнении расчетов на основе анализа электромагнитных полей, необходимого для корректного выбора магнитных подшипников. Проверка разработанных методов расчета для нескольких вариантов машин показала высокую достоверность полученных результатов.

8. Для проведения экспериментальных исследований создана современная экспериментальная база, включающая модели высокооборотных синхронных генерато-

ров с постоянными магнитами и ветроэнергетическую установку с низкооборотным синхронным генератором с постоянными магнитами, предназначенные для проверки и подтверждения разработанных методов исследований и являющиеся необходимым этапом, предшествующим созданию головных образцов машин.

Основные публикации по теме диссертации

Основные положения диссертации представлены в следующих опубликованных работах:

Научные издания по перечню ВАК:

1. Данилевич, Я.Б. Быстроходный турбогенератор для систем нетрадиционной энергетики / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, В.А. Сапожников и др. // Известия РАН. Энергетика. - 2002. - №5. - С.98-102.
2. Сверхбыстроходный генератор-двигатель для газовых микротурбин / Я.Б. Данилевич, А.В. Иванова, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Электротехника. - 2004. - №5. - С.25-29.
3. Данилевич, Я.Б. Электромагнитное поле асинхронной машины с массивным нанокompозитным ротором / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Известия РАН. Энергетика. - 2007. - №2. - С.26-36.
4. Данилевич, Я.Б. Дисковый генератор для нетрадиционной энергетики. Проблемы и решения. / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Известия РАН. Энергетика. - 2008. - №4. - С.70-76.
5. Микротурбогенераторы повышенной мощности: возможности и перспективы / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Альтернативная энергетика и экология. - 2008.- №1. - С.149-151.
6. Перспективный турбогенератор для децентрализованной (локальной) энергетики. / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина и др. // Известия РАН. Энергетика. - 2009. - №4. - С.89-97.
7. Автономная интегрированная ветроэнергостановка с использованием наноструктурированных материалов для хранения и преобразования электрической энергии / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина и др. // Альтернативная энергетика и экология. - 2009. - №4. - С.81-90.
8. Разработка технологии получения и хранения водорода с использованием наноструктурированных материалов для автономной интегрированной ветроэнергосистемы производства электроэнергии / Я.Б. Данилевич, В.А. Жабрев, В.Д. Гончаров, И.Ю. Кручинина и др. // Физика и химия стекла. - 2009. - Т.35. - №5. - С.650-666.
9. Кручинина, И.Ю. МДС многофазных обмоток статора с дробным числом Q пазов на полюс и фазу / И.Ю. Кручинина, Л.Ю. Штайнле // Электротехника. - 2010. - №8. С.9-15.
10. Данилевич, Я.Б. Перспективные электромеханические преобразователи энергии на основе новых материалов и покрытий / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина и др. // Электротехника. - 2010. - №9. - С.2-9.
11. Ветростанция с контрроторной турбиной / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, Б.Н. Миронов // Альтернативная энергетика и экология. - 2011. - №1. - С.40-42.

12. Данилевич, Я.Б. Метод расчета гармоник в зазоре электрических машин с постоянными магнитами / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Л.Ю. Штайнле // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2011.- №117. - С.221-226.
13. Кручинина, И.Ю. Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя с учетом распределения поля токов в массивном роторе / И.Ю. Кручинина // Известия РАН. Энергетика. - 2011 - №6. - С.90-97.
14. Кручинина, И.Ю. О выборе конструкции и материалов асинхронного двигателя / И.Ю. Кручинина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. - 2011. - №4. - С.51-57.
15. Кручинина, И.Ю. Электрические машины для малой энергетики: некоторые проблемы проектирования пазовой зоны статора / И.Ю. Кручинина // Известия РАН. Энергетика. - 2012. - №1. - С.113-119.
16. Кручинина, И.Ю. Проблемные вопросы создания высокоскоростных мини-турбогенераторов и пути их решения./ И.Ю. Кручинина, В.Н. Антипов // Информационно-управляющие системы. - 2012. - №4. - С.25-34.

Другие публикации автора по теме диссертации

1. Исследования магнитного поля в зазоре синхронных машин с постоянными магнитами с различными концентраторами магнитного поля / И.Ю. Кручинина, А.И. Иванова, Ю.Ф. Хозиков, Л.Ю. Штайнле // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. ОЭЭП РАН, СПб. - 2002. - Вып. 4. - С. 155-162.
2. Кручинина, И.Ю. Перспективы применения газотурбинных установок в энергетике и возможности малой энергетики в период реформирования / И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования / ОЭЭП РАН, СПб. - 2003. - Вып. 5. - С. 116-118.
3. Современные проблемы электромашиностроения и задачи энергетики / Я.Б. Данилевич, А.Н. Коваленко, И.Ю. Кручинина и др. // Тяжелое машиностроение. - 2003. - №10. - С.2-6.
4. Кручинина, И.Ю. Новые материалы для совершенствования характеристик современных электрических машин / И.Ю. Кручинина // В сб. Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. - СПб.: 2004. - Вып. 6. - С.110-120.
5. Данилевич, Я.Б. Электродвигатели нового поколения / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Энергия: экономика, техника, экология. - 2004. - №10. - С. 42-44.
6. Danilevich, Ja. Permanent magnet generator for 200 KW station of a new type / Ja. Danilevich, V. Antipov, I. Kruchinina // Proc. of ICEM-2004. - Poland, Krasow: 2004. - P. 308-310.
7. Danilevich, Ya. B. Generator-converter unit for small gaspower plant / Ya. B. Danilevich, I. Yu. Kruchinina, Sobczyk Tadeush, Yu. F. Khozikov // Proceedings 2004 of St-Petersburg IEEE Chapters, SPb ETV «LETI» Publishing House. - SPb, 2004. - P.17-18.
8. Danilevich, Ja. B. New generation a.c. motors with solid rotors and their parameters / Ja. B. Danilevich, Yu. F. Khozikov, I. Yu. Kruchinina // International Conference «Radio - That Connects Time. 110 Anniversary of Radio Invention». May 18-21, 2005. - Saint-Petersburg, Russia. Proceedings of St. Petersburg IEEE Chapters. - 2005. – Vol. II. - P. 7-9.

9. Danilevich, Janush B. The electromagnetic field as a base for determination of the main AC machines parameters / Janush B. Danilevich, Irina Yu. Kruchinina, Yuvenaly Ph. Khozikov // ICEM-2006, Chania, Crete Island, Greece, September 2-5, 2006.-P.564.
10. Данилевич, Я.Б. Новые материалы – новые возможности для энергетики / Я.Б. Данилевич, В.В. Гусаров, И.Ю. Кручинина//Сб. научно-популярных статей – победителей конкурса РФФИ 2006 года. Вып. 10. М., Октопус Природа, 2007.- С.468-475.
11. The brushless permanent magnet disk generator for new generation power stations / Ja. Danilevich, B. Mironov, I. Kruchinina, A. Ivanova // Book of Digests of ISEF'2007. - Prague, Czech Republic: 2007. - P.63-64.
12. The investigation of material application effect on electromagnetic field and characteristics of electrical machine / Ja. Danilevich, I. Kruchinina, Yu. Khozikov, etc. // Book of Digests of ISEF'2007. - Prague, Czech Republic: 2007. - P.370-371.
13. Современная электромеханика. Проблемы и перспективы: Аналитический обзор / Я.Б. Данилевич, И.З. Богуславский, В.В. Попов, И.Ю. Кручинина; под ред. В.В. Попова - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. – 114 с.
14. Ja. B. Danilevich, V. N. Antipov, I. Yu. Kruchinina, Yu. Ph. Khozikov. Design Considerations of Submersible Unprotected Solid-Rotor Induction Motor.// Proceedings of the XVIII International Conference on Electrical Machines. Paper ID 940. IEEE Catalog Number: CFP0890B-CDR. ISBN: 978-1-4244-1736-0. Vilamoura, Portugal, 6th-9th September 2008.
15. Данилевич, Я.Б. Роль децентрализованной энергетики в общей энергосистеме / Я.Б. Данилевич, А.Н. Коваленко, И.Ю. Кручинина // Академия энергетики. - 2008. - №1. - С.42-45.
16. Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков. - СПб.: Наука, 2009. – 102 с.
17. Design considerations of high-speed permanent magnet machines for decentralized electro engineering. Evaluating approach / I. Kruchinina, V. Antipov, A. Ivanova, Yu. Khozikov // Proc. of International IEEE Conference devoted to the 150-annivesary of Alexander S. Popov. - St. Petersburg, 2009. - P.156-161.
18. Determination of parameters by means of finite element analysis in two-ply solid-rotor 3150 kW induction motor / Janush B. Danilevich, Victor N. Antipov, Irina Yu. Kruchinina etc. // Proc. of XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering ISEF 2009. - Arras, France, 2009. - P.87-88.
19. Данилевич, Я.Б. Наноструктурированные материалы для хранения и преобразования электрической энергии / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина // Сб. тезисов докладов участников Второго Международного форума по нанотехнологиям. - М.: 2009. - С.495-497.
20. Данилевич, Я.Б. Экологически чистый автономный интегрированный энергокомплекс для получения, хранения и преобразования электроэнергии и водорода / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Б.Н. Миронов // Тезисы докладов Пятой российской конференции «Физические проблемы водородной энергетики». - СПб: Изд-во СПбГПУ, 2009. - С.1-2.
21. Finite element analysis and comparison parameters of permanent magnet synchronous and two-ply solid rotor induction motors / Janush B. Danilevich, Victor N. Antipov, Irina Yu. Kruchinina etc. // Przegląd Elektrotechniczny. - 2010. – No.5. - P.133-136.

22. Органосиликатные покрытия быстроходного ротора турбогенератора / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, В.В. Московская // Тез. докладов XXI Всероссийского совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям. - СПб.: 2010. - С.22-23.
23. Finite Element Analysis and Comparison Parameters of Permanent Magnet Synchronous and Two-ply Solid Rotor Induction Motors / I. Kruchinina, J. Danilevich, V. Antipov etc. / Computer field models of electromagnetic devices. - IOS press. - 2010. - P.353-359.
24. Ветростанция с двухроторной турбиной / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Б.Н. Миронов, Л.Ю. Штайнле // Индустрия. - 2010. - №1. - С.54-55.
25. Данилевич, Я.Б. Новые материалы для децентрализованной энергетики / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина // Известия Академии электротехнических наук РФ. - 2011. - №1. - С.3-13.
26. Турбогенераторы для малой энергетики / И.Ю. Кручинина, Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, А.Д. Грозов // Сб. тезисов XII Всемирного электротехнического конгресса. - М.: 2011. -С.2-3.
27. Современная электромеханика. Проблемы и перспективы. Часть II: Аналитический обзор / В.Н. Антипов, И.З. Богуславский, А.С. Ватаев, Я.Б. Данилевич, Ф.Д. Дубинин, В.Н. Забоин, И.А. Иванова, И.Ю. Кручинина, В.В. Попов//под ред. В.В. Попова. - СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2011. - 127с.
28. Кручинина, И.Ю. Разработка перспективных материалов для малой энергетики в ИХС РАН / И.Ю. Кручинина // Тез. докладов Российской конференции – научной школы молодых ученых «Новые материалы для малой энергетики и экологии. Проблемы и решения». - Санкт-Петербург, 2011. - С.17-18.
29. Снижение механических потерь минитурбогенераторов малоразмерных газотурбинных установок / В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, Т.В. Хамова, В.В. Московская // Тез. докладов Российской конференции – научной школы молодых ученых «Новые материалы для малой энергетики и экологии. Проблемы и решения». - Санкт-Петербург, 2011. - С.29.
30. V.N. Antipov, I.Yu. Kruchinina, A.D. Grozov, A.V. Ivanova. Size Spectrum Investigation of Mini Turbogenerators for Gas Turbine Units // Proceedings of the XX International Conference on Electrical Machines. Marseille, France. 2d-5th September 2012. PID2412641.

ПАТЕНТЫ

1. Ветроэлектростанция: пат. на полезную модель 70940 Рос. Федерация: МПК F03D 9/00 / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Б.Н. Миронов; заявитель и патентообладатель Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова Российской академии наук. - №2007117517/22; заявл. 10.05.2007; опубл.: 20.02.2008, Бюл. №5.
2. Устройство преобразования электрической энергии: пат. 2408126 Рос. Федерация: МПК H02K 7/18, F03B 15/06. / Ю.Ф. Антонов, Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина; заявитель и патентообладатель Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова Российской академии наук. - №2009126445/07; опубл.: 01.07.2009. Бюл. №36.
3. Обмотка электрической машины переменного тока: заявка 2009125295 Рос. Федерация: МПК H02K 3/28 / Данилевич Я.Б., Богуславский И.З., Кручинина И.Ю., Штайнле Л.Ю.; заявитель Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова Российской академии наук. - №2009125295/07; заявл. 01.07.2009; опубл.: 10.01.2011, Бюл. № 1.